

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

**Antonio Golub**

Zagreb, 2017. godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Damir Markučić, dipl. ing.

Student:

Antonio Golub

Zagreb, 2017. godina.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se svome mentoru prof.dr.sc Damiru Markučiću na pruženoj pomoći i korisnim savjetima tijekom izrade rada. Zahvaljujem se Tomislavu Kezeli na stručnoj pomoći oko izrade praktičnog dijela rada.

Posebno bi se zahvalio svojoj obitelji na velikoj podršci tijekom cijelog studija.

Antonio Golub



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**  
Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija zrakoplovstva



Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **ANTONIO GOLUB** Mat. br.: 0035195373

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **REFERENTNI ETALONI ZA ISPITIVANJE PENETRANTIMA**

Naslov rada na engleskom jeziku: **CALIBRATION BLOCKS FOR PENETRANT INSPECTION**

Opis zadatka:

Penetrantsko ispitivanje najstarija je suvremena metoda nerazornih ispitivanja u svrhu detekcije površinskih nepravilnosti. Široko je primjenjiva u održavanju i ispitivanju ispravnosti komponenti zrakoplovnih konstrukcija. Prije provedbe samog ispitivanja od velike je važnosti provjeriti značajke i sposobnost penetrantskog sustava za određeno ispitivanje. S tim ciljem, normom EN ISO 3452-3 propisani su tehnički zahtjevi za izradu i sve relevantne značajke referentnih etalona koji se koriste u svrhu provjere sposobnosti penetrantskog sustava.

Potrebno je uvodno istražiti dostupne izvore i dati pregled postupaka izrade različitih vrsta referentnih etalona. Temeljem toga sistematizirati te etalone obzirom na vrste značajki penetrantskog sustava koje se utvrđuju i/ili procjenjuju pomoću tih etalona.

Na odabranome etalonu potrebno je osmisliti variranja relevantnih parametara i/ili elemenata penetrantskog sustava. Za digitalne slikovne zapise dobivenih indikacija potrebno je predložiti način kvantitativne karakterizacije parametara indikacija koje su relevantne za procjenu sposobnosti penetrantskog sustava (npr. dimenzioniranje veličine indikacije ili učestalosti višestrukih indikacija).

Zaključno komentirati dobivene rezultate kao i primjenjivost provjerenog penetrantskog sustava i postupka na komponentama zrakoplovnih konstrukcija.

U radu navesti korištenu literaturu, norme kao i eventualnu pomoć.

Zadatak zadan:  
30. studenog 2016.

Rok predaje rada:  
**1. rok:** 24. veljače 2017.  
**2. rok (izvanredni):** 28. lipnja 2017.  
**3. rok:** 22. rujna 2017.

Predviđeni datumi obrane:  
**1. rok:** 27.2. - 03.03. 2017.  
**2. rok (izvanredni):** 30. 06. 2017.  
**3. rok:** 25.9. - 29. 09. 2017.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Damir Markučić

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Ivica Smojver

**SADRŽAJ**

SADRŽAJ .....	I
POPIS SLIKA .....	III
POPIS TABLICA.....	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY .....	VI
1. SUSTAV ISPITIVANJA PENETRANTIMA .....	1
1.1 POSTUPAK ISPITIVANJA PENETRANTIMA .....	2
2. UTJECAJNI ČIMBENICI NA OSJETLJIVOST PENETRANTSKOG SUSTAVA.....	4
2.1. Čimbenici koji nisu pod nadzorom ispitivača [4] .....	4
2.1.1. Ljudski čimbenici ispitivanja .....	4
2.1.2. Stanje vida ispitivača.....	4
2.1.4. Okolina u kojoj se vrši ispitivanje, stav i motivacija ispitivača .....	4
2.1.5. Hrapavost površine i stanje komada na kojem se vrši ispitivanje.....	5
2.1.7. Priroda nepravilnosti .....	5
2.2. Čimbenici koji su pod nadzorom ispitivača [4].....	5
2.2.1. Starost penetranta .....	5
2.2.2. Onečišćenje penetranta.....	5
2.2.3. Koncentracija sredstva za uklanjanje viška penetranta .....	6
2.2.4. Onečišćenje sredstva za uklanjanje viška penetranta.....	6
2.2.5. Temperatura penetranta i ispitivanog dijela .....	6
2.2.6. Tlak i temperatura ispiranja viška penetranta s površine .....	6
2.2.7. Debljina sloja razvijaa .....	7
2.2.8. Osvjetljenost (Iluminacija).....	7
3. RADNI ETALONI ZA ISPITIVANJE SUSTAVA PENETRANTIMA .....	8
3.1. Tipovi radnih etalona.....	8
3.1.1. Radni etalon tipa 1.....	8
3.1.2. Radni etalon tipa 2.....	9
4. IZRADA PLANA ISPITIVANJA .....	12
4.1. Plan ispitivanja .....	12
4.2. Provedba ispitivanja.....	12
4.3. Koraci u ispitivanju .....	15
5. ANALIZA DOBIVENIH DIGITALNIH SLIKOVNIH ZAPISA.....	17
5.1. Prikaz dobivenih digitalnih slikovnih zapisa.....	17
5.1.1. Prvi set ispitivanja .....	17
5.1.2. Drugi set ispitivanja .....	18
5.1.3. Treći set ispitivanja .....	19
5.1.4. Četvrti set ispitivanja.....	20
5.2. Računalna obrada dobivenih digitalnih slikovnih zapisa .....	21
5.2.1. Koraci obrade slikovnog zapisa .....	21
5.3. Prikaz rezultata .....	25
5.3.1. Tablični prikaz rezultata.....	25
5.3.2. Grafički prikaz rezultata.....	26
6. ZAKLJUČAK .....	29

7. LITERATURA.....	30
--------------------	----

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Osnovni postupak ispitivanja penetrantima .....	3
Slika 2.	Procedura ispitivanja za različite metode PT-a [1] .....	3
Slika 3.	Radni etalon tipa 1 .....	9
Slika 4.	Radni etalon tipa 2 [8] .....	
	zvjezdice [8] .....	10
Slika 5.	Indikacija u obliku .....	
Slika 6.	Izgled alata za izradu nepravilnost u obliku zvijezda [7] .....	11
Slika 7.	Luksmetar .....	13
Slika 8.	Izgled ispitnog postava za ispitivanje zajedno s UVmetrom .....	13
Slika 9.	Podešavanje postavki fotografiranja .....	14
Slika 10.	Nanošenje penetranta .....	15
Slika 11.	Uklanjanje viška penetranta s površine etalona .....	15
Slika 12.	Nanešeni razvijatelj i razvijanje penetranta kad je etalon postavljen na bočnu stranu .....	16
Slika 13.	UV intezitet 800 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ .....	17
Slika 14.	UV intezitet 1000 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ .....	17
Slika 15.	UV intezitet 1500 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ .....	17
Slika 16.	UV intezite 800 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ .....	18
Slika 17.	UV intezite 1000 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ .....	18
Slika 18.	UV intezitet 1500 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ .....	18
Slika 19.	UV intezitet 800 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ .....	19
Slika 20.	UV intezitet 1000 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ .....	19
Slika 21.	UV intezitet 1500 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ .....	19
Slika 22.	UV intezitet 800 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ .....	20
Slika 23.	UV intezitet 1000 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ .....	20
Slika 24.	UV intezitet 1500 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ .....	20
Slika 25.	Sučelje programa imageJ .....	21
Slika 26.	Učitavanje slike u program .....	21
Slika 27.	Kalibracija fotografije .....	22
Slika 28.	Odabir crtanja kružnice .....	22
Slika 29.	Opisana kružnica indikaciji .....	23
Slika 30.	Izračun površine kruga .....	23
Slika 31.	Prikaz rezultat jednog mjerenja .....	24
Slika 32.	Grafički prikaz izmjerenih vrijednosti zajedno s referentnom vrijednošću promjera nepravilnosti od 5.5 mm .....	26
Slika 33.	Grafički prikaz izmjerenih vrijednosti zajedno s referentnom vrijednošću promjera nepravilnosti od 4.5 mm .....	27
Slika 34.	Grafički prikaz izmjerenih vrijednosti zajedno s referentnom vrijednošću promjera nepravilnosti od 4 mm .....	27
Slika 35.	Grafički prikaz izmjerenih vrijednosti zajedno s referentnom vrijednošću promjera nepravilnosti od 3.5 mm .....	28
Slika 36.	Grafički prikaz izmjerenih vrijednosti zajedno s referentnom vrijednošću promjera nepravilnosti od 3 mm .....	28

**POPIS TABLICA**

<i>Tablica 1. Plan ispitivanja.....</i>	<i>12</i>
<i>Tablica 2. Prvi set ispitivanja .....</i>	<i>25</i>
<i>Tablica 3. Drugi set ispitivanja.....</i>	<i>25</i>
<i>Tablica 4. Treći set ispitivanja.....</i>	<i>25</i>
<i>Tablica 5. Četvrti set ispitivanja.....</i>	<i>25</i>



## SAŽETAK

Rad je podijeljen na dva dijela, teorijski i praktični dio.

U teorijskom dijelu su navedeni etaloni koji se koriste u penetrantskoj metodi ispitivanja, njihov način izrade, te su sistematizirani po značajkama penetrantskog sustava koje se utvrđuju i/ili procjenju pomoću tih etalona. U samom radu su navedeni čimbenici koji utječu na rezultate ispitivanja a podijeljeni su u dvije glave grupe, one koje možemo kontrolirati i one koje ne možemo kontrolirati.

U praktičnom dijelu je osmišljen plan po kojem su varirani utjecajni čimbenici i to isključivo oni koje možemo kontrolirati. Zaključno su dobiveni digitalni zapisi računalno obrađeni i prikazani u grafičkom obliku.

Ključne riječi: penetrantska metoda ispitivanja, značajke penetrantskog sustava, utjecajni čimbenici

## SUMMARY

The task is divided into two parts, theoretical and practical part.

In the theoretical part is specified standards which are used in penetrant test methods, their method of preparation, and systematization the features of penetrant system that can identify and/or estimation using these standards. In the article is described factors that affect on the test results and divided into two head groups, those that we can control and those that can not control.

In the practical part is designed plan which vary with influencing factors, and only those that we can control. The final obtained digital records are computer analyzed and presented in graphical form.

Key words: penetrant test method, features of penetrant system, influencing factors

## 1. SUSTAV ISPITIVANJA PENETRANTIMA

Sustav ispitivanja penetrantima je najstarija i najjednostavnija metoda nerazornog ispitivanja, koja datira još iz 19. stoljeća kada su se koristili petrolej i kreda kao sredstva za provjeru funkcionalnosti dijelova.

Ova metoda se koristi isključivo za pronalazak površinskih nepravilnosti, može se odrediti orijentacija pukotina ali nikako njezina točna veličina. Metoda se zasniva na sposobnosti penetranta da uz kapilarni efekt uđe u pukotine, iz čega proizlazi zakonitost da omjer širine i dubine pukotine bude veći od 0.025 [1], kako bi se penetrant zadržao u pukotini i nakon odstranjivanja viška penetranta i da bi razvijatelj imao što izvući na površinu i prikazati indikaciju ukoliko ona postoji.

Pošto se penetrantska metoda smatra najjednostavnijom, ova metoda je uistinu najjednostavniji ako naši zahtjevi nisu prestrogi, odnosno ako se ispitivanje ne radi na nekim kritičnim dijelovima konstrukcije, jer ova metoda u velikoj mjeri ovisi o znanju i iskustvu samog ispitivača kao i o velikom broju čimbenika okoline u kojoj se ispituje. Stoga sve utjecaje moramo pratiti i zabilježiti kako bi provedeni postupak ispitivanja bio vjerodostojan, ali to nije dovoljno jer je potrebno da uređaji i pomagala s kojima to radimo budu ispravna i umjerena.

## 1.1 POSTUPAK ISPITIVANJA PENETRANTIMA

Penetrantsko ispitivanje je jedna od najčešće korištenih nerazornih metoda ispitivanja, njegova popularnost može se pripisati dvama glavnim faktorima: njegove relativne jednostavnosti korištenja i fleksibilnosti. Može se koristiti za ispitivanje gotovo bilo kojih materijala, pod uvjetom da njegova površina nije izrazito gruba ili porozna. Materijali na kojima se najčešće vrši ispitivanje su; metali, staklo, različiti keramički materijali, guma i plastika.

Postupak je sljedeći [2] :

(1) Priprema površine: jedan od najkritičnijih koraka, površina mora biti bez ulja, masti, vode ili drugih sredstava koje bi spriječile ulazak penetranta u pukotinu. Površina se može očistiti kemijskim ili mehaničkim putem. Najčešće se koristi kemijsko čišćenje ili lagana mehanička čišćenja(žičanom četkom), iz razloga što jače mehaničko čišćenje(pjeskarenje, sačmarenje) može zatvoriti ulaz penetrantu u pukotinu.

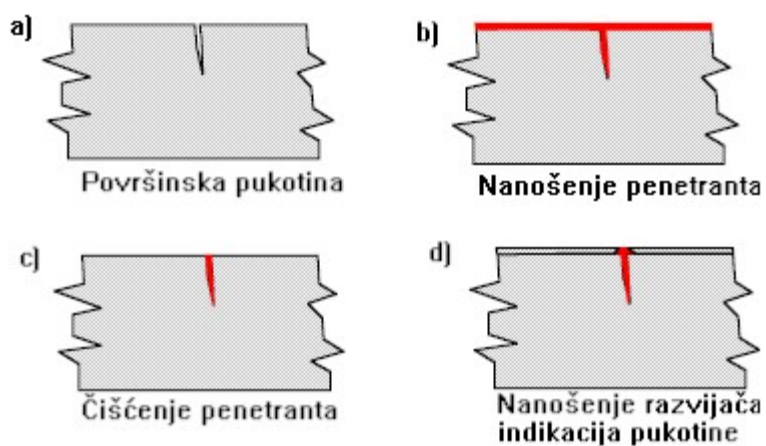
(2) Nanošenje penetranta: prskanjem(sprej doza), kistom ili uranjanjem

(3) Odstranjivanje viška penetranta: ispiraje vodom, otapalom ili emulgatorom, ovisno o vrsti penetranta

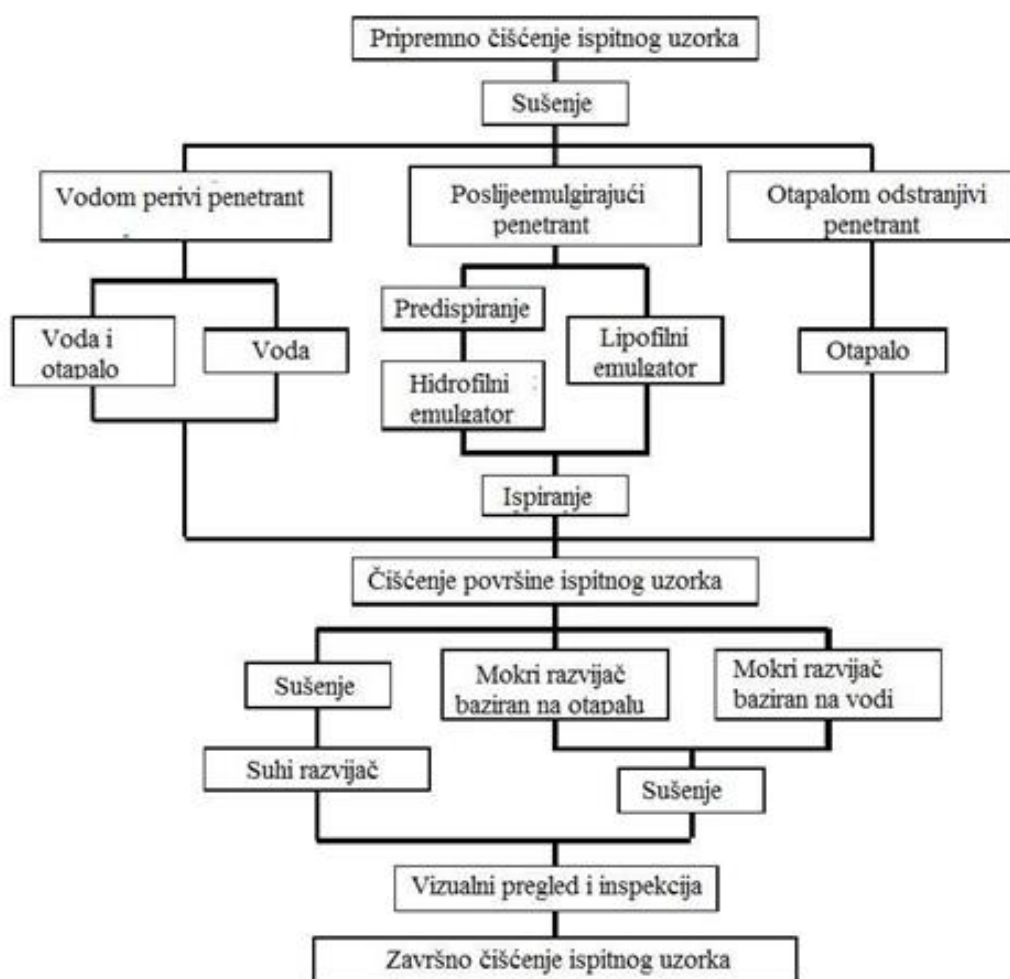
(4) Nanošenje razvijaa: tanki sloj se nanosi na ispitnu površinu, koji će izvući penetrant iz pukotina na površinu kako bi bila vidljiva indikacija. Razvijaa se može nanositi zaprašivanjem(u prahu), prskanjem ili uranjanjem.

(5) Vizualni pregled ispitne površine: pregled se vrši pod svjetlom dovoljne osvijetljivosti koja je propisana

(6) Završno čišćenje: odstranjuje se razvijaa kako ne bi naštetio funkcionalnosti površine



Slika 1. Osnovni postupak ispitivanja penetrantima



Slika 2. Procedura ispitivanja za različite metode PT-a [1]

## **2. UTJECAJNI ČIMBENICI NA OSJETLJIVOST PENETRANTSKOG SUSTAVA**

### **2.1. Čimbenici koji nisu pod nadzorom ispitivača [4]**

#### ***2.1.1. Ljudski čimbenici ispitivanja***

Su usko povezani s iskustvom, percepcijom nepravilnosti i okolinom u kojoj se provodi ispitivanje.

#### ***2.1.2. Stanje vida ispitivača***

Normom EN 571-1 [3] se traži godišnja provjera stanja vida ispitivača. U provjeru je osim provjere dioptrije uključena i provjera vezana uz prepoznavanje boja. Normom je dopušteno da ispitivanje provodi i ispitivač koji nosi naočale ali izričito njemu odgovarajuće dioptrije i da ih ne skida za vrijeme ispitivanja.

#### ***2.1.3. Iskustvo i percepcija nepravilnosti***

U ovaj čimbenik su uključeni znanje ispitivača i njegovo poznavanje komada kojeg ispituje, odnosno koje su to nepravilnosti koje može očekivati, da li su to nepravilnosti u obliku uključina, pukotina, linijskih ili kružnih pukotina, i na kojim mjestima mogu biti prisutne nepravilnosti.

#### ***2.1.4. Okolina u kojoj se vrši ispitivanje, stav i motivacija ispitivača***

Stav i motivaciju kao čimbenike u ispitivanju se odnosi na to u kakvim uvjetima se provodi ispitivanje, koji direktno utječu na raspoloženje i želju za radom ispitivača, da li se to ispitivanje provodi na otvorenom prostoru, na kiši, jakom suncu, grijanom hangaru sve su to čimbenici koji se odražavaju na rad ispitivača i na krajnje rezultate.

### **2.1.5. Hrapavost površine i stanje komada na kojem se vrši ispitivanje**

Hrapavost površine se najviše odražava na uklanjanje viška penetranta s površine komada kojeg ispitujemo. Hrapava površina zadržava puno više penetranta te na taj način ugrožava rezultate ispitivanja. Zahtjevi za uklanjanjem su znatno veći kod primjene fluorescentnog penetranta, u odnosu na obojeni penetrant.

### **2.1.7. Priroda nepravilnosti**

Sama priroda nepravilnosti povezana je zajedno s iskustvom ispitivača, odnosno njegovom procjenom kakve nepravilnosti može očekivat, a koje su gore navedene.

## **2.2. Čimbenici koji su pod nadzorom ispitivača [4]**

### **2.2.1. Starost penetranta**

Izrazito je važna jer sa vremenom penetrant gubi boju (pigment) koji je iznimno značajan za kontrast kod pronalaženja oštećenja. Mehanizmi degradacije penetranta su: fotokemijsko izbjeljivanje, propadanje boje, dekontaminacija, oksidacija, sublimacija boje.

### **2.2.2. Onečišćenje penetranta**

Kontaminacija penetranta drugom tekućinom će promijeniti površinsku napetost i kontaktni kut penetranta. Ako se penetrant pomiješa s vodom površinska napetost takve mješavine jednaka je zbroju površinskih napetosti vode i penetrant. Povećavanjem površinske napetosti povećava se kontaktni kut što nam nije u cilju.

### **2.2.3. Koncentracija sredstva za uklanjanje viška penetranta**

Kod pranja viška penetranta s površine nakon penetriranja, izrazito je važno s kojim sredstvom se to provodi, kojom količinom i kako se ispitivano sredstvo suši nakon toga, jer ukoliko to izvršimo na neprikladan način nemožemo biti sigurni u dobivene rezultate.

### **2.2.4. Onečišćenje sredstva za uklanjanje viška penetranta**

Čistilo viška penetranta dozvoljava blaga onečišćenja, međutim ona se moraju držati u određenim granicama, jer preveliki sadržaj (>10%), može utjecati na odstranjivanje viška penetranta i na taj način smanjiti kontrast i dovesti do lažnih indikacija.

### **2.2.5. Temperatura penetranta i ispitivanog dijela**

Budući da se promjenom temperature mijenja površinska napetost penetranta temperatura je izrazito utjecajna na osjetljivost penetrantskog sustava. Temperature između 27°C i 50°C smatraju se onim kod kojih možemo očekivati optimalne rezultate ispitivanja. Temperature niže od 5°C dovode do nezadovoljavajućih rezultata.

### **2.2.6. Tlak i temperatura ispiranja viška penetranta s površine**

Tlak i temperatura ispiranja viška penetranta s površine su obično propisani u postupku ispitivanja. Često se koriste sprej doze, kupke i mlaz vode za ispiranje. U pravilu su četiri vrste penetranta s obzirom na sredstva odstranjivanja viška penetranta. [5]

(A) Vodom perivi- ovi penetranti se mogu isprati s vodom, ne iziskuju nikakve dodatne korake i sredstva, ali potreban je oprez da se ne ispere višak penetranta

(B) Postemulzivni lipofilni- prije finalnog ispiranja nanosi se emulzija koja ostatak penetranta čini topivim u vodi, oprez da se samo penetrant izvan pukotine učini topivim u vodi

(C) Solventni penetranti- umjesto vode za ispiranje se koristi otapalo, ima najveću osjetljivost

(D) [6] - Hidrofilni penetranti- slična metodi (B), osjetljivija, a glavna razlika je u tome što nije osjetljiva na vrijeme variranja kod primjene emulzije, ne moramo biti zabrinuti zbog otapanja previše penetranta



### **2.2.7. Debljina sloja razvijaa**

Jedna od funkcija razvijaa je da izvuče penetrant iz pukotine i da ga širi po površini. Tanji sloj razvijaa ravnomjerno nanesen na površinu može više širiti dostupan penetrant horizontalno nego vertikalno jer je manja udaljenost u vertikalnom smjeru, stoga je to glavni razlog zbog čega se zahtjeva tanak sloj razvijaa.

### **2.2.8. Osvjetljenje (Iluminacija)**

Pravilno osvjetljenje je od iznimne važnosti kada se vizualno provjeravaju površine u potrazi za eventualnim indikacijama. Kada se koristi crveni penetrant osvjetljenje je od iznimne važnosti. Kod ispitivanja obojenim penetrantom propisano osvjetljenje je minimalno 500 lx, a kod fluorescentnog osvjetljenje od maksimalno 20 lx, a intenzitet UV svjetla  $1000 \mu\text{m}/\text{cm}^2$  kada je izvor UV svjetla na 40 cm od površine koju ispitujemo.

### 3. RADNI ETALONI ZA ISPITIVANJE SUSTAVA PENETRANTIMA

#### 3.1. Tipovi radnih etalona

Norma EN ISO 3452-3 [7] propisuje dva tipa radnih etalona. Tip 1 se koristi za provjeru osjetljivosti penetrantskog sustava, a tip 2 za sposobnost odstranjivanja viška penetranta s površine ispitnog uzorka.

##### 3.1.1. Radni etalon tipa 1

Etalon tipa 1 predstavlja 4 pločice presvučene Ni-Cr prevlakom različitih debljina (10, 20, 30 i 50  $\mu\text{m}$ ) na osnovni materijal od mjedi. Dimenzije pločice su 35 mm x 100 mm x 2 mm. Pukotine se izrađuju uzdužnim istezanjem pločice, nakon čega je svaka pločica uzdužno prerezana kako bi dobili par s približno jednakim pukotinama.

Omjer širine i dubine pukotine treba biti približno 1:20. Sa svakom pločicom dolazi certifikat i fotografija fluorescentnih penetrantskih indikacija pukotina napravljena pod UV osvjetljenjem s kojom se mogu uspoređivati rezultati ispitivanja.

Radni etaloni tipa 1 prema EN ISO 3452-3 [7] služe za ispitivanje osjetljivosti, odnosno klasifikaciju penetranata prema razredu osjetljivosti kojem pripadaju. Pločice s dubinom pukotina od 10  $\mu\text{m}$ , 20  $\mu\text{m}$  i 30  $\mu\text{m}$  se koriste za ispitivanje fluorescentnih penetranata (s obzirom da su oni u pravilu osjetljiviji), a obojeni penetranti se ispituju pločicama od 30  $\mu\text{m}$  i 50  $\mu\text{m}$ . Kriterij za klasificiranje penetranata prema osjetljivosti je mogućnost generiranja indikacija na pukotinama određene dimenzije.



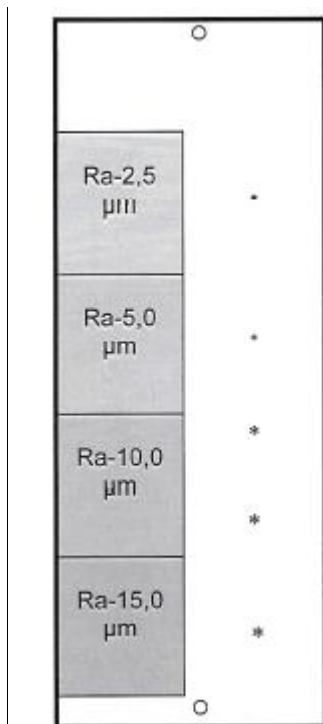
*Slika 3. Radni etalon tipa 1*

### **3.1.2. Radni etalon tipa 2**

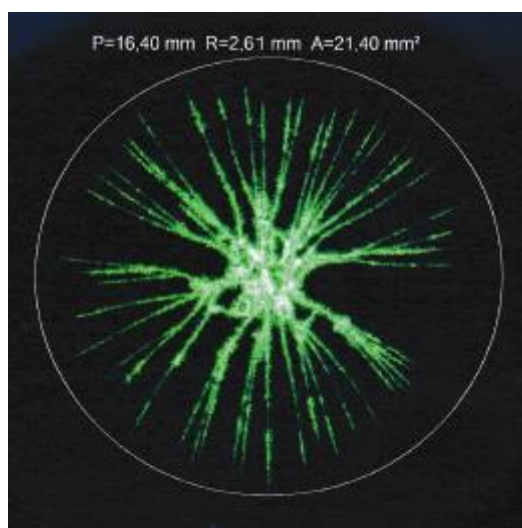
Radni etalon tipa 2 prema EN ISO 3452-3 [7] koristi se za ispitivanje sposobnosti ispiranja penetranta s površine. Najčešće se koristi za provjeru penetranta koji su već korišteni, odnosno stajali u otvorenim spremnicima, kao i penetrantskih sustava (sprej doza) u radu. Dimenzije pločice su 155 mm x 50 mm x 2,5 mm. Etalon se sastoji od jedne pločice izrađene od austenitnog čelika, i podijeljena je uzdužno na dva dijela. Jedna strana je presvučena kromom u kojem je načinjeno 5 nepravilnosti u obliku zvjezdica, a druga polovica ima 4 područja sa različitim hrapavostima (2,5  $\mu\text{m}$ , 5  $\mu\text{m}$ , 10  $\mu\text{m}$ , 15  $\mu\text{m}$ ).

Za ispitivanje sposobnosti ispiranja penetrant koristi se polovica na kojoj su definirane različite hrapavosti. Te površine se obrađuju elektroerozijom, a područje s najmanjom hrapavosti se pjeskari. Nepravilnosti u obliku zvjezdica izrađuju se utiskivanjem polukuglastog utiskivača na preši ili uređaju za mjerenje tvrdoće različitim silama (2 kN, 3,5 kN, 5 kN, 6,5 kN i 8 kN). Promjeri nepravilnosti su: 3 mm, 3,5 mm, 4 mm, 4,5 mm, 5,5 mm. Nepravilnosti služe za praćenje osjetljivosti, najčešće kontinuirano, u radu, kao bi se uvjerali u

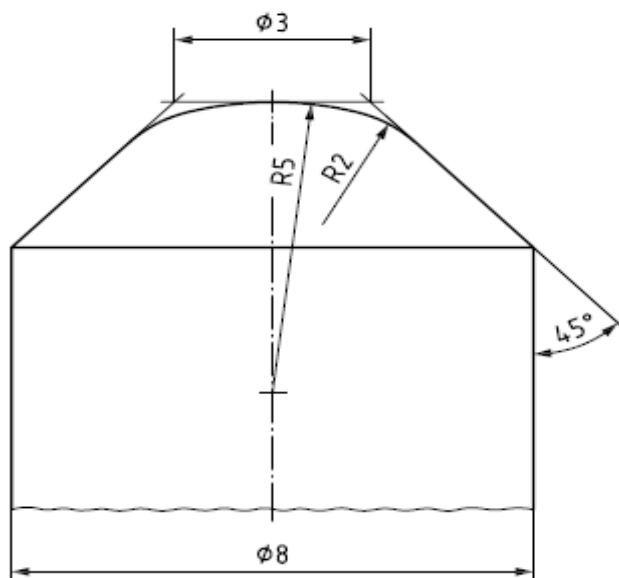
ispravnost našeg penetrantskog sustava, a taj postupak bi se trebao izvesti prije odlaska na ispitivanje stvarnih komada, ali nikako za određivanje klase penetranta ili usporedbu osjetljivosti različitih penetranta. Kako bi osigurali sljedivost penetrantskog sustava kojeg koristimo, u ovom radu je osmišljena kvantitativna analiza digitalnih slikovnih zapisa nepravilnosti na etalonu s kojom je omogućena sljedivost penetrantskog sustava.



Slika 4. Radni etalon tipa 2 [8]



Slika 5. Indikacija u obliku zvjezdice [8]



Slika 6. Izgled alata za izradu nepravilnost u obliku zvijezda [7]

## 4. IZRADA PLANA ISPITIVANJA

### 4.1. Plan ispitivanja

U planu ispitivanja odlučio sam se za fluorescentni penetrant visokog nivoa osjetljivosti jer se on u puno većoj mjeri koristi u zrakoplovstvu, njegova primjena se preporučuje na primarnim dijelovima strukture i na rotirajućim dijelovima zrakoplova, a ispitivanje se provodilo na radnom etalonu tipa 2 i to samo na dijelu koji služi za provjeru kontinuirane osjetljivosti PT sustava. Etalon koji će se koristiti u ispitivanju je izrađen i certificiran od strane tvrtke „Helling“, u samom certifikatu su navedena odstupanja izrađenih nepravilnosti na etalonu u odnosu na normu EN ISO 3452-3 [7], vrijednosti promjera nepravilnosti na korištenom etalonu su po certifikatu unutar tolerancije koja iznosi 10% vrijednosti od propisane normom. Od svih prethodno navedenih čimbenika koji utječu na osjetljivost PT sustava odlučio sam se da tijekom ispitivanja variramo s vremenom penetriranja, položajem etalona i intenzitetom UV svjetla.

Ispitivanje će se vršiti u četiri seta, setovi su podjeljeni po vremenu penetriranja i položaju etalona za vrijeme penetriranja i razvijanja, a unutar samog pojedinog seta mijenjat će se UV intenzitet.

Br.	T <sub>pen</sub> [min]	T <sub>raz</sub> [min]	Položaj referentnih nepravilnosti	UV intezitet [μW/cm <sup>2</sup> ]	UV intezitet [μW/cm <sup>2</sup> ]	UV intezitet [μW/cm <sup>2</sup> ]
1	3	10	Prema gore	800	1000	1500
2	3	10	Prema gore	800	1000	1500
3	7	10	U stranu	800	1000	1500
4	7	10	U stranu	800	1000	1500

*Tablica 1. Plan ispitivanja*

### 4.2. Provedba ispitivanja

Ispitivanje se provodilo u RTG stanici Laboratorija za nerazorna ispitivanja kako bi smo osigurali da osvjetljenost površine s bijelim svijetlom bude maksimalno 20 lx, u našem slučaju luksmetar je pokazivao 7 lx.

Kao postolje na kojem smo odradili ispitivanje smo koristili ručna kolica za teret koje su bile podesive po visini što nam je koristilo za promjenu inteziteta UV svijetla. Od mjerne opreme koju smo koristili su luksmetar, UVmetar, i segmet izvlačećeg metra koji nam je poslužio kao mjera za kasniju kalibraciju broja piksela prema segmentu metra, kako bi imali valjane izmjere relevantnih veličina.



*Slika 7. Luksmetar*



*Slika 8. Izgled ispitnog postava za ispitivanje zajedno s UVmetrom*

Kako bi rezultate koje dobijemo međusobno bili usporedivi bilo je potrebno namjestiti postavke fotografiranja i fokus, kako bi fotografije bile jednake rezolucije, koja je od iznimne važnosti za kasniju kalibraciju broja piksela prema segmentu metra koji stoji uz etalon. Postavke fotografiranja su bile ručno namještene. Fotoaparat koje se koristio je marke SONY model DSC-F828, vrijeme ekspozicije je bilo namještno na 1/30 s, žarišna duljina 21 mm, bez bljeska, format slikovnog zapisa je JPG, a rezolucija slikovnih zapisa je 3264x2448, 3264 piksela je širina, a 2448 piksela je visina.



*Slika 9. Podešavanje postavki fotografiranja*



### 4.3. Koraci u ispitivanju

4.3.1. Nanošenje penetranta, na prethodno očišćenu i odmašćenu površinu etalona, koristio se fluorescentni penetrant u sprej dozi.



*Slika 10. Nanošenje penetranta*

4.3.2. Nakon zadanog vremena penetriranja koja je u dva od ukupnih četiri seta ispitivanja bilo isto u jednom slučaju 3 min, a u drugom 7 min slijedilo je čišćenje viška penetranta s površine etalona



*Slika 11. Uklanjanje viška penetranta s površine etalona*

4.3.3 . Sljedeći korak je bilo nanošenje tankog sloja razvijača na površinu i čekanje do isteka vremena razvijanja koje je trajalo 10 min

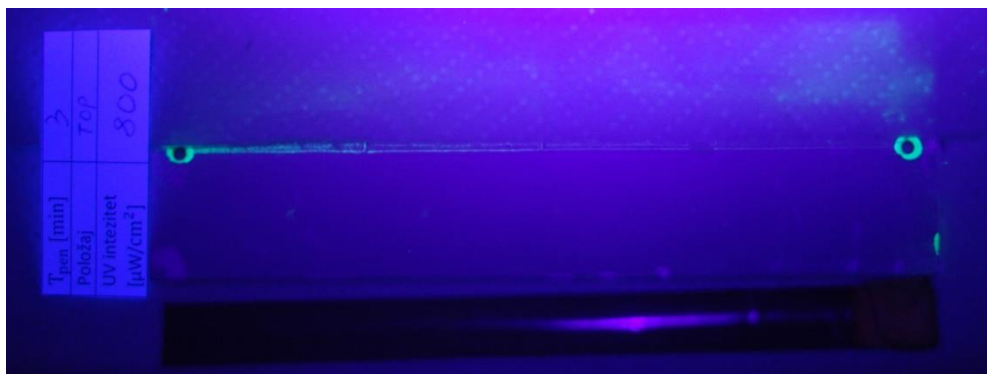


*Slika 12. Nanešeni razvijač i razvijanje penetranta kad je etalon postavljen na bočnu stranu*

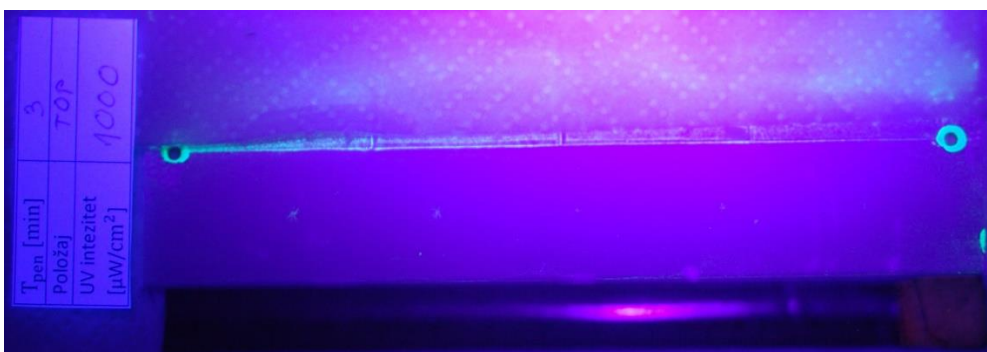
## 5. ANALIZA DOBIVENIH DIGITALNIH SLIKOVNIH ZAPISA

### 5.1. Prikaz dobivenih digitalnih slikovnih zapisa

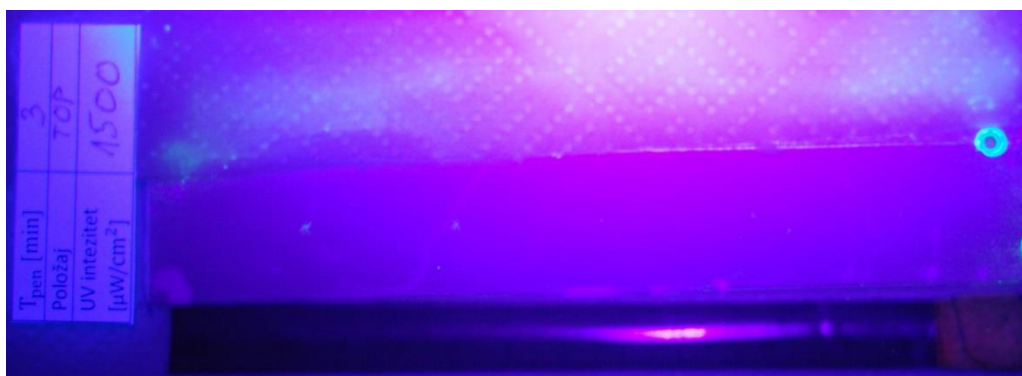
#### 5.1.1. Prvi set ispitivanja ( $T_{\text{pen}}=3$ min, $T_{\text{raz}}=10$ min, položaj lica etalona prema gore)



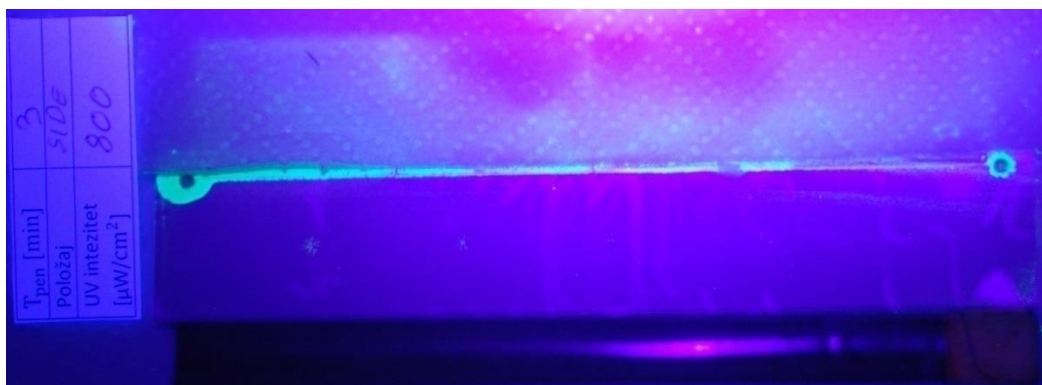
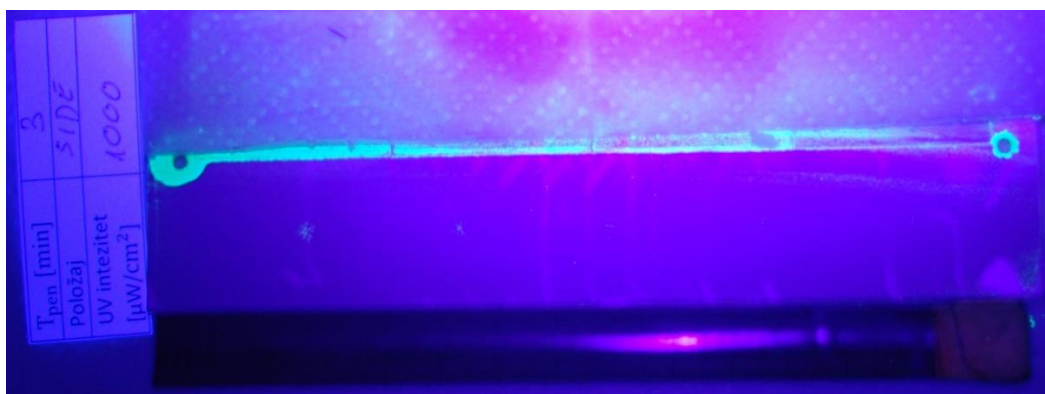
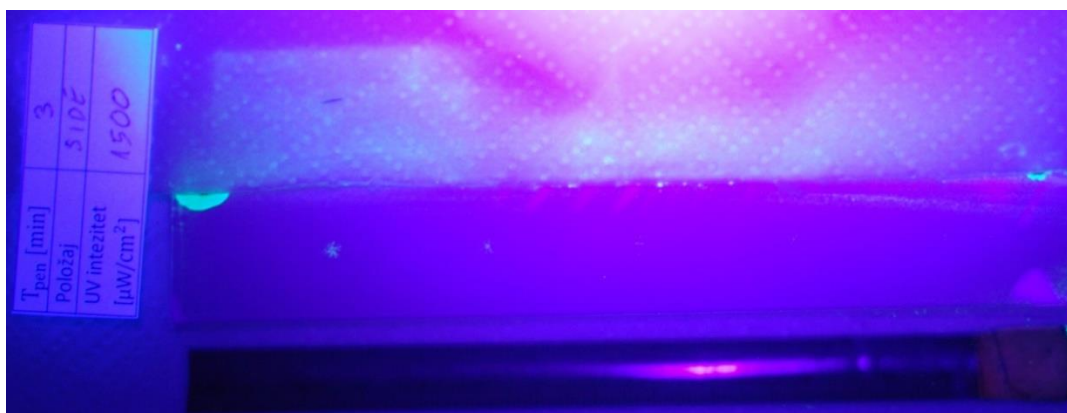
Slika 13. UV intenzitet  $800 \mu\text{W}/\text{cm}^2$



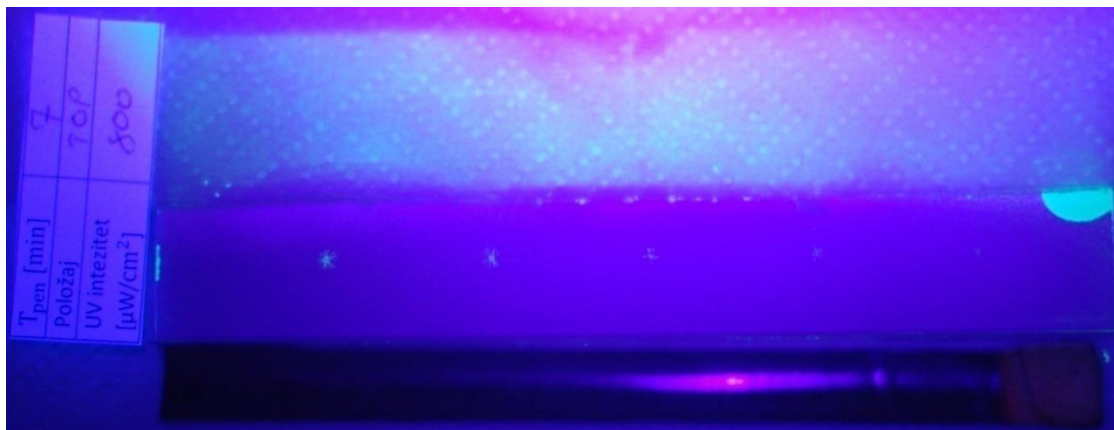
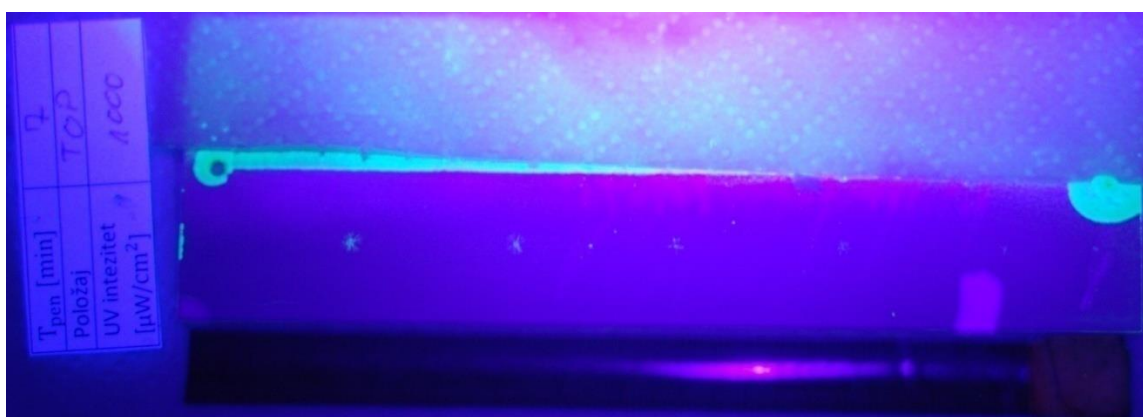
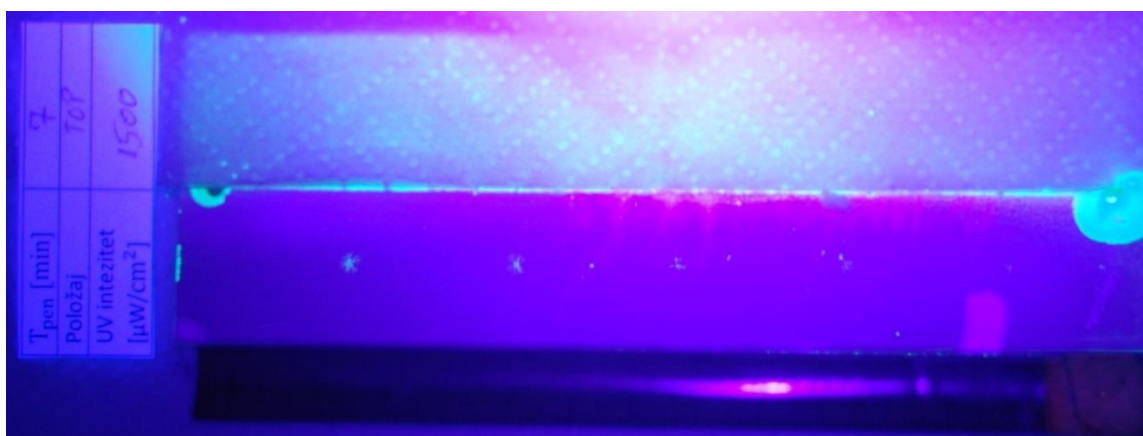
Slika 14. UV intenzitet  $1000 \mu\text{W}/\text{cm}^2$

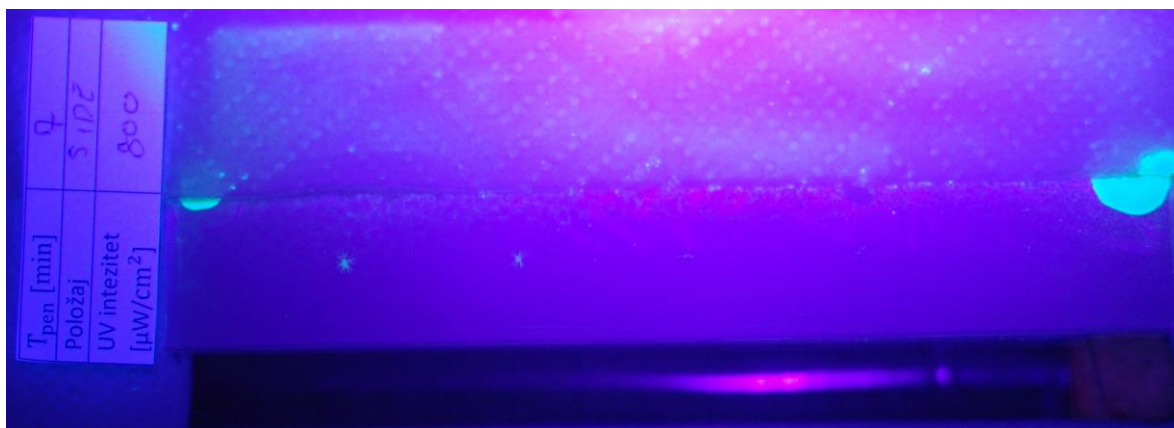
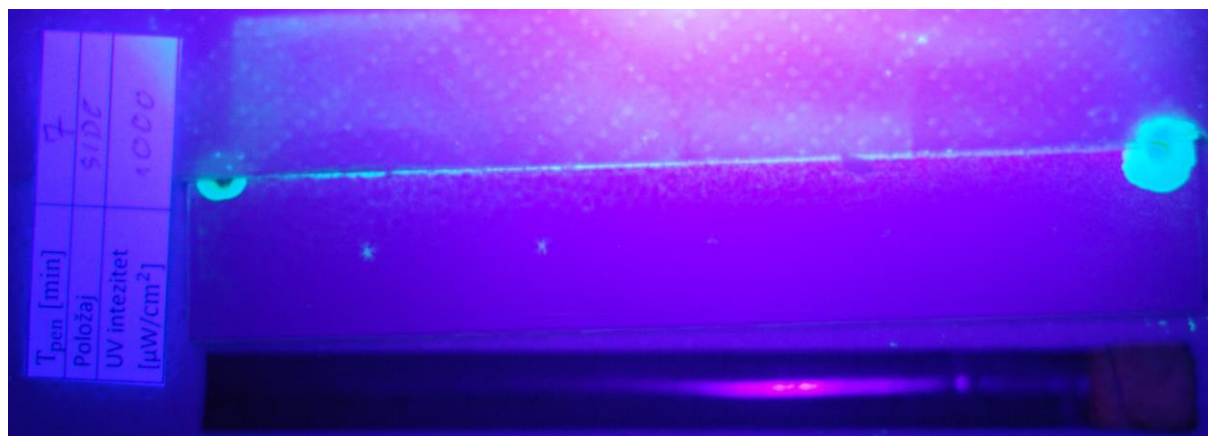
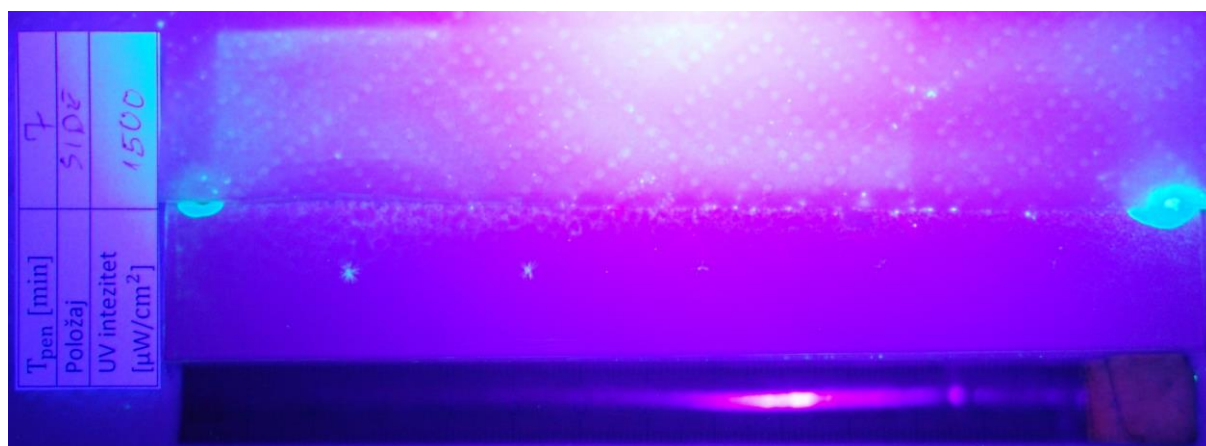


Slika 15. UV intenzitet  $1500 \mu\text{W}/\text{cm}^2$

**5.1.2. Drugi set ispitivanja** ( $T_{\text{pen}}=3$  min,  $T_{\text{raz}}=10$  min, položaj lica etalona u stranu)*Slika 16. UV intezite  $800 \mu\text{W}/\text{cm}^2$* *Slika 17. UV intezite  $1000 \mu\text{W}/\text{cm}^2$* *Slika 18. UV intezitet  $1500 \mu\text{W}/\text{cm}^2$*

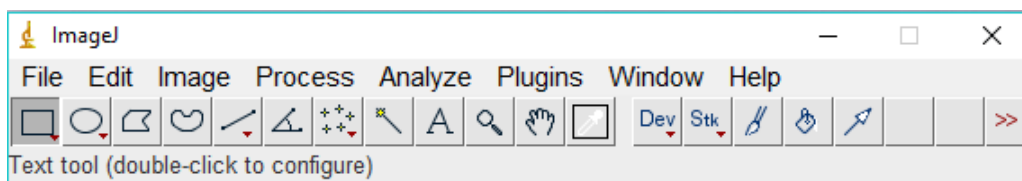


**5.1.3. Treći set ispitivanja** ( $T_{\text{pen}}=7$  min,  $T_{\text{raz}}=10$  min, položaj lica etalona prema gore)*Slika 19. UV intezitet  $800 \mu\text{W}/\text{cm}^2$* *Slika 20. UV intezitet  $1000 \mu\text{W}/\text{cm}^2$* *Slika 21. UV intezitet  $1500 \mu\text{W}/\text{cm}^2$*

**5.1.4. Četvrti set ispitivanja** ( $T_{\text{pen}}=7$  min,  $T_{\text{raz}}=10$  min, položaj lica etalona u stranu)*Slika 22. UV intenzitet  $800 \mu\text{W}/\text{cm}^2$* *Slika 23. UV intenzitet  $1000 \mu\text{W}/\text{cm}^2$* *Slika 24. UV intenzitet  $1500 \mu\text{W}/\text{cm}^2$*

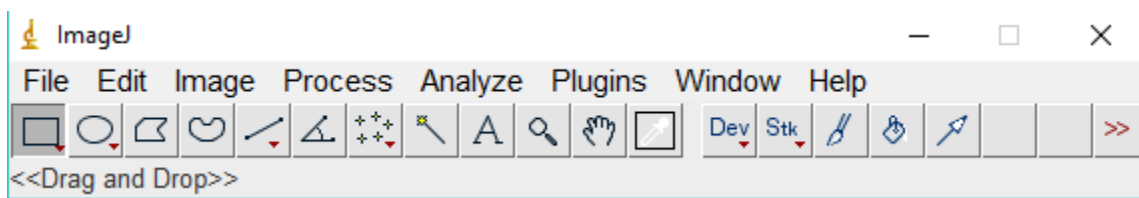
## 5.2. Računalna obrada dobivenih digitalnih slikovnih zapisa

U računalnoj obradi slikovnih zapisa koristio se programski paket imageJ [9].



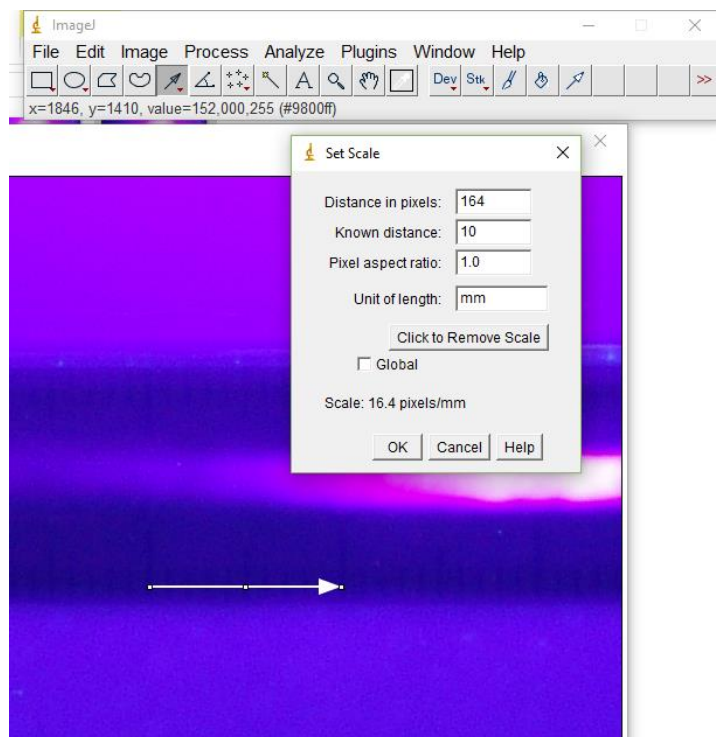
Slika 25. Sučelje programa imageJ

### 5.2.1. Koraci obrade slikovnog zapisa



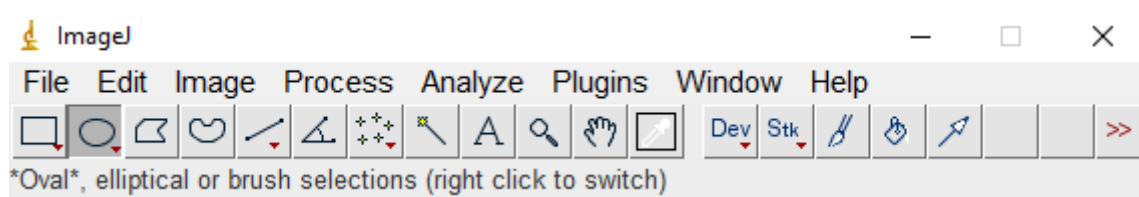
Slika 26. Učitavanje slike u program

Korak vezan uz kalibraciju piksela slikovnog zapisa prema poznatoj mjeri koju smo postavili uz fotografiju, se izvodi na način da se na alatnoj traci lijevim klikom odabere crtanje linija iz razloga jer nam je kao mjerilo poslužio segment izvlačećeg metra. Nakon izvršenog crtanja linije, kliknemo na padajući meni „Analyze“ i odaberemo „Set scale“ i upišemo poznatu vrijednost mjerila i mjernu jedinicu u kojoj ju izražavamo, u ovom slučaju to je bilo 10 mm i završavamo naredbom „OK“. U ovom samom postupku je došlo do poteškoća očitavanja stvarne mjere, zbog velikog zacrnjenja, pa će se to odraziti i na konačne rezultate.



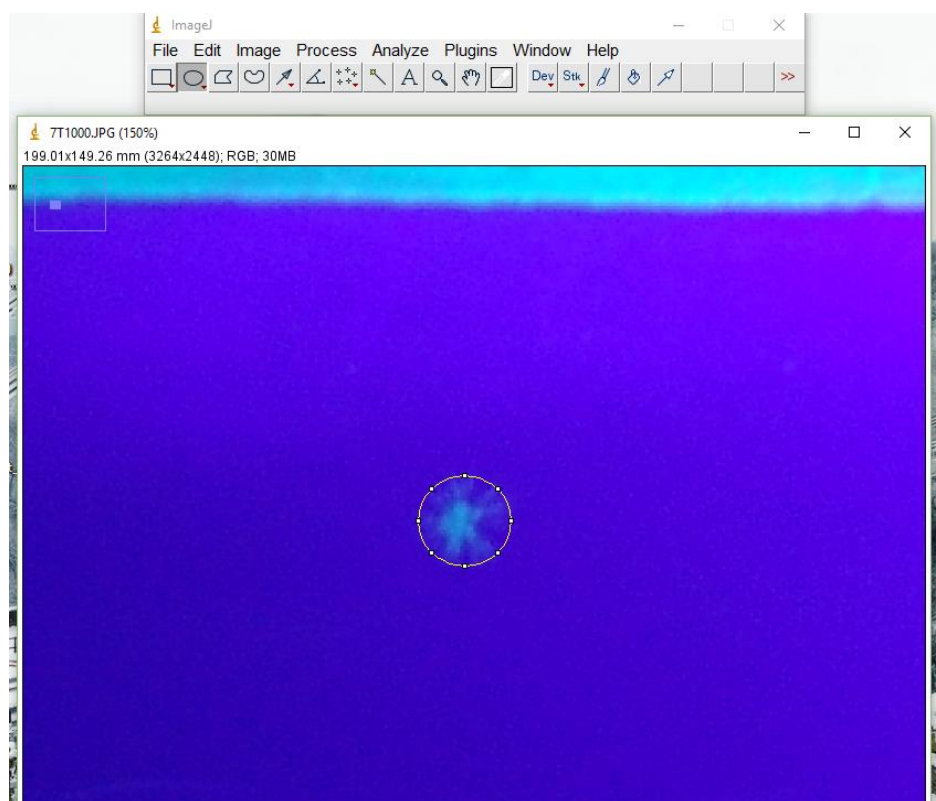
Slika 27. Kalibracija fotografije

Kao veličinu koju ćemo uspoređivati u analizi korišten je promjer opisane kružnice indikacijama (zvjezdicama) koje su u danim uvjetima vidljive na etalonu. Do promjera smo došli iz površine opisane kružnice indikacijama. Taj dio se izvodi na taj način da se na alatnoj traci odabere naredba „Oval“ i indikaciji opišemo kružnicu.



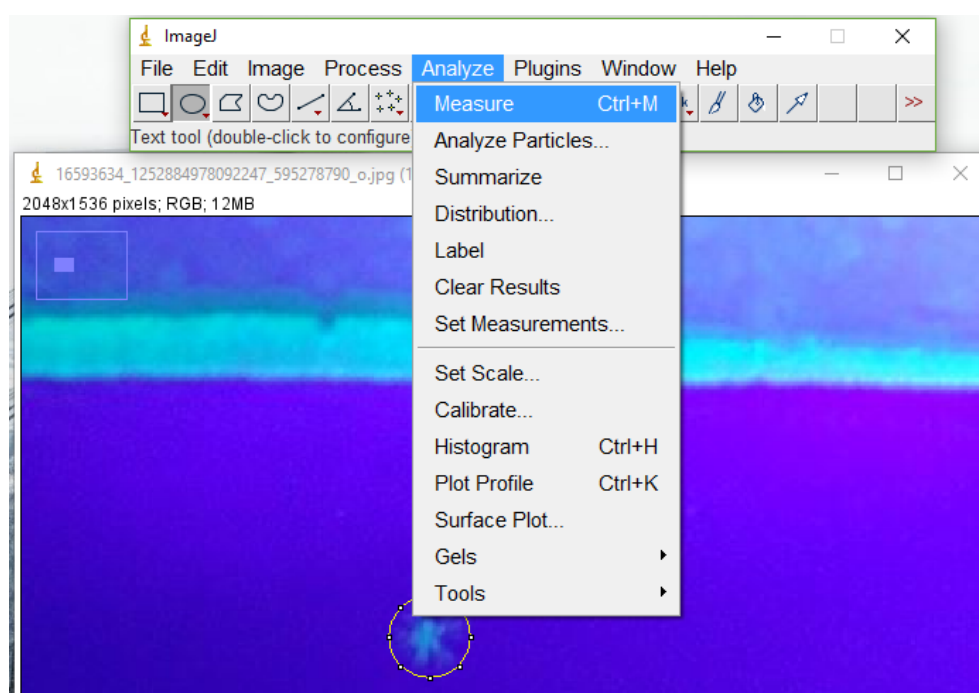
Slika 28. Odabir crtanja kružnice



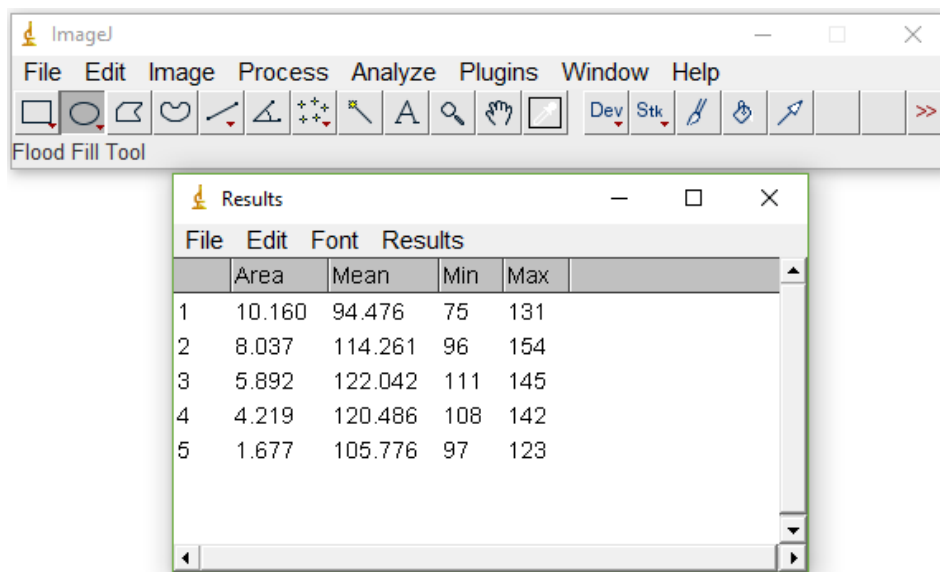


*Slika 29. Opisana kružnica indikaciji*

Završni korak je izračun površine kruga koji program sam računa naredbom „Measure“ u padajućem izborniku „Analyze“.



*Slika 30. Izračun površine kruga*



*Slika 31. Prikaz rezultat jednog mjerenja*

U prvom stupcu je vrijednost površine kruga opisanog nepravilnosti, a sljedeća tri stupca su vezana uz standardu devijaciju odnosno prosječno odstupanje od prosjeka, a do toga dolazi iz razloga što opisanom kružnicom zahvaćamo i piksele koji nisu dio nepravilnosti i samim time unosimo grešku u konačni rezultat.

### 5.3. Prikaz rezultata

#### 5.3.1. Tablični prikaz rezultata

T <sub>pen</sub> =3 min, lice etalona prema gore			
d[mm]	UV intezitet [ $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ]		
	800	1000	1500
d1	3,05	3,66	3,27
d2	2,32	3,11	2,63
d3	1,67	2,81	0,73
d4	-	2,01	1,29
d5	-	1,44	-

**Tablica 2. Prvi set ispitivanja**

T <sub>pen</sub> =3 min, lice etalona u stranu			
d[mm]	UV intezitet [ $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ]		
	800	1000	1500
d1	3,2	3,72	3,60
d2	3,16	3,20	3,2
d3	2,66	2,90	2,73
d4	2,44	2,53	2,32
d5	1,32	1,74	1,46

**Tablica 3. Drugi set ispitivanja**

T <sub>pen</sub> =7 min, lice etalona prema gore			
d[mm]	UV intezitet [ $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ]		
	800	1000	1500
d1	3,96	3,38	3,72
d2	3,63	3,32	3,38
d3	2,89	2,84	2,87
d4	2,81	2,53	2,48
d5	1,81	1,04	1,27

**Tablica 4. Treći set ispitivanja**

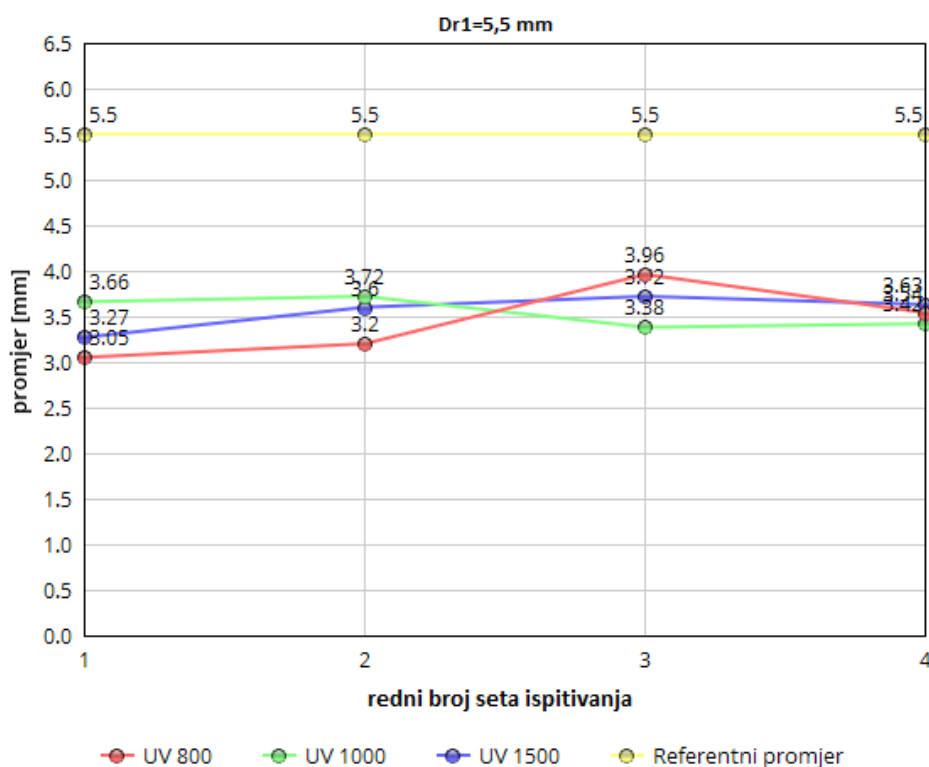
T <sub>pen</sub> =7 min, lice etalona u stranu			
d[mm]	UV intezitet [ $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ]		
	800	1000	1500
d1	3,54	3,42	3,63
d2	3,45	3,02	3,23
d3	2,60	1,83	2,87
d4	2,16	1,62	2,63
d5	2,02	1,20	3,16

**Tablica 5. Četvrti set ispitivanja**

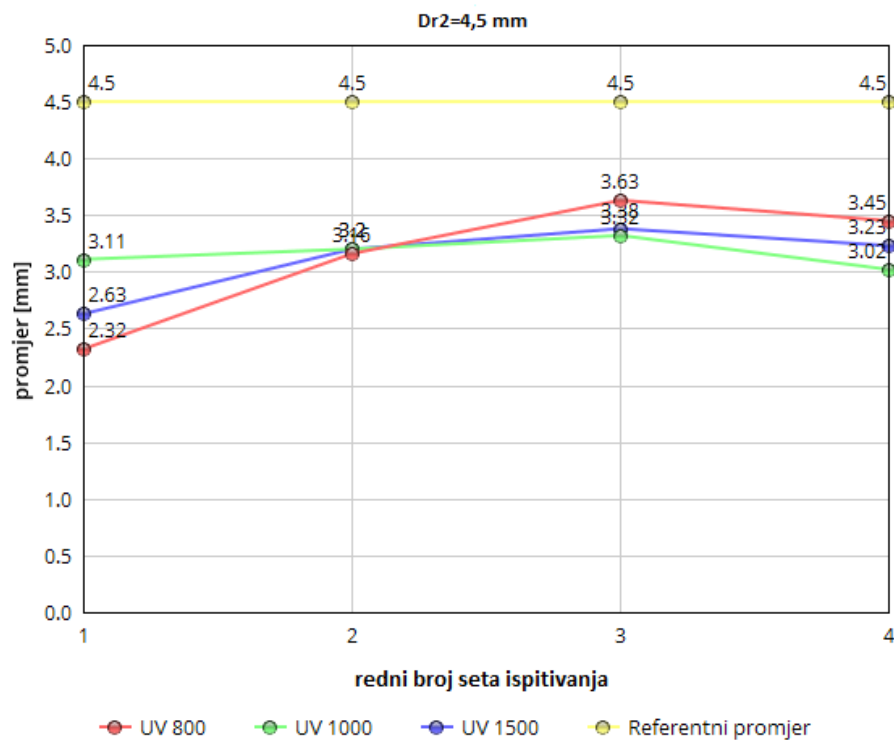
Oznake d1 ,d2 ,d3, d4, d5 stoje uz vrijednosti počevši od najveće koje su dobivene računalnom obradom slikovnih zapisa, i one predstavljaju promjer nepravilnosti dobiven u praktičnom dijelu rada, referentne vrijednosti promjera nepravilnosti Dr1, Dr2, Dr3, Dr4, Dr5 su normom definirane, redom počevši od najveće vrijednosti: 5,5 mm, 4,5 mm, 4 mm, 3,5 mm, 3 mm.

### 5.3.2. Grafički prikaz rezultata

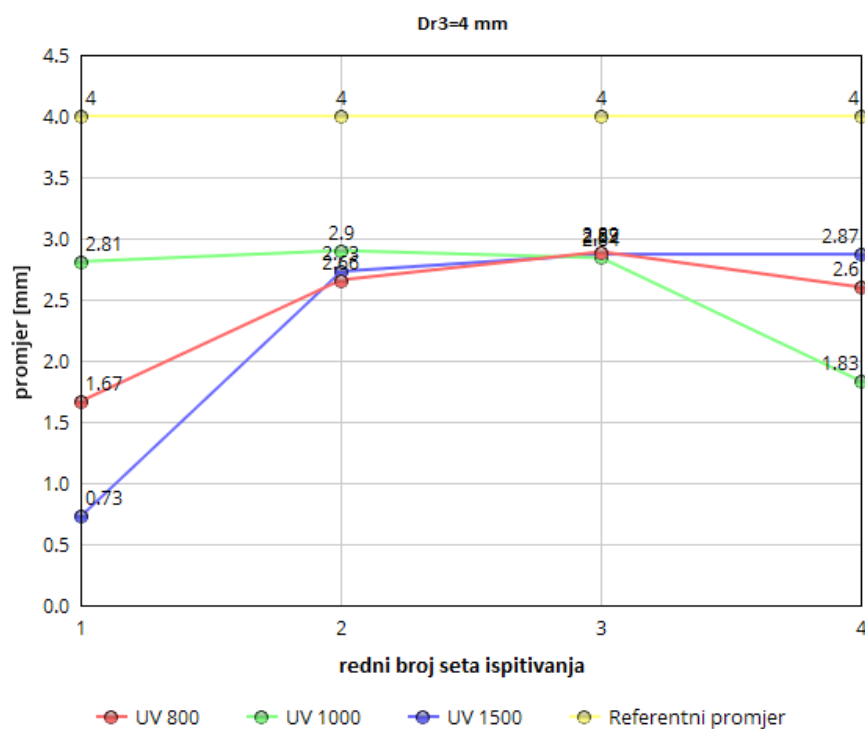
Kako bi dobiveni rezultati bili prikladnije prikazani i kako bi se lakše vidio utjecaj pojedinih čimbenika na rezultate ispitivanja izrađen je grafički prikaz rezultata, u kojem će biti prikazano više rezultata na jednom grafu. Višestruki prikaz je osmišljen na taj način da je za pojedinu vrijednost referentnog promjera nepravilnosti, prikazana vrijednost koja je dobivena u praktičnom dijelu u ovisnosti inteziteta UV svjetla, vremena penetriranja i položaja etalona.



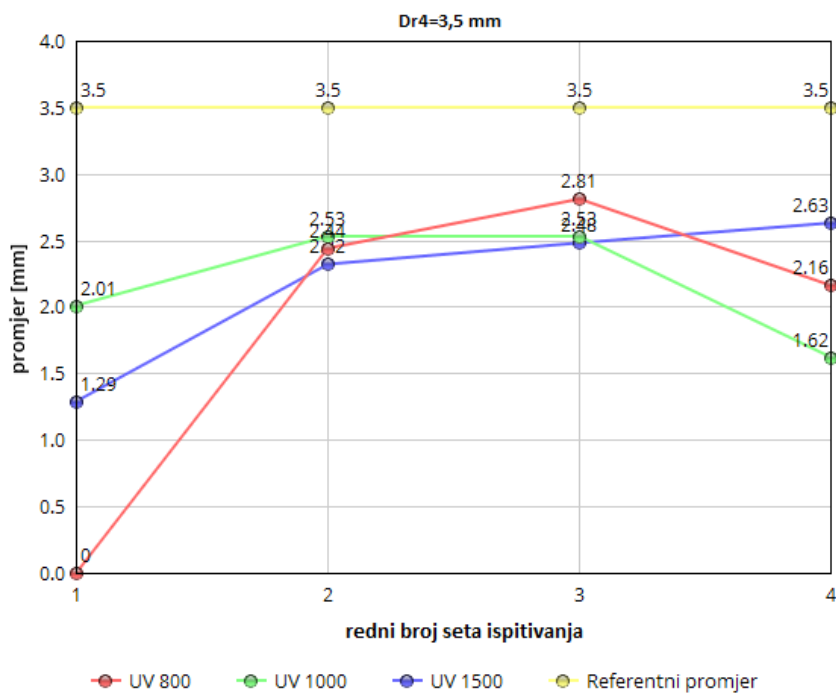
Slika 32. Grafički prikaz izmjerenih vrijednosti zajedno s referentnom vrijednošću promjera nepravilnosti od 5.5 mm



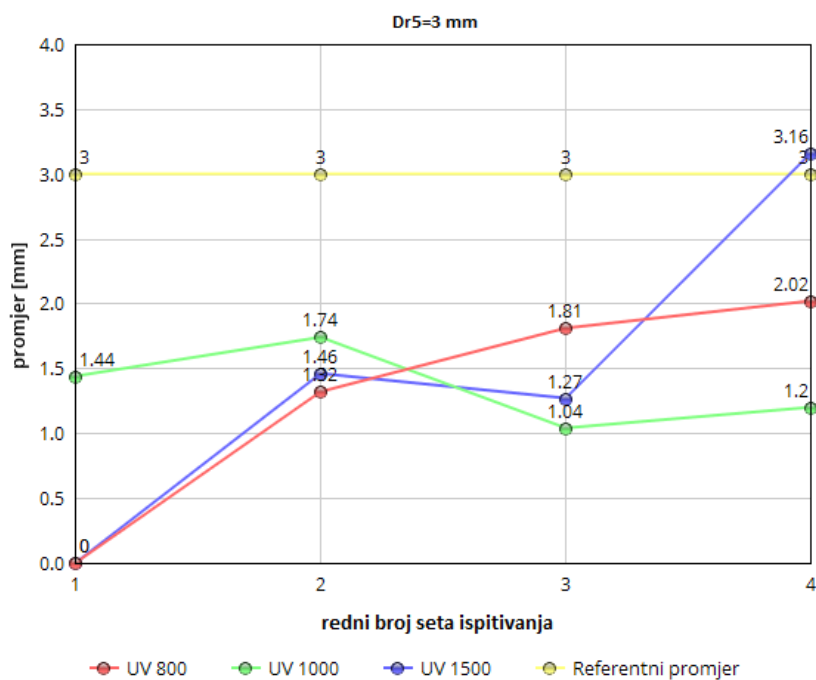
Slika 33. Grafički prikaz izmjerenih vrijednosti zajedno s referentnom vrijednošću promjera nepravilnosti od 4.5 mm



Slika 34. Grafički prikaz izmjerenih vrijednosti zajedno s referentnom vrijednošću promjera nepravilnosti od 4 mm



Slika 35. Grafički prikaz izmjerenih vrijednosti zajedno s referentnom vrijednošću promjera nepravilnosti od 3.5 mm



Slika 36. Grafički prikaz izmjerenih vrijednosti zajedno s referentnom vrijednošću promjera nepravilnosti od 3 mm

## 6. ZAKLJUČAK

Iz dobivenih rezultata u praktičnom dijelu ispitivanja možemo zaključiti da je od iznimne važnosti biti dosljedan uputama za ispitivanje, odnosno pridržavati se zahtjeva koji su preporučeni od proizvođača, kako se ne bi pojavile lažne indikacije ili da indikacije izostanu, a prisutne su u komponenti koju ispitujemo. Ukoliko se ne daje dovoljne pažnje samoj pripremi ispitivanja, uvjetima promatranja i prije svega naročito je bitno strpljenje i iskustvo, može doći do neuspješne detekcije, a to može dovesti, ovisno o veličini nepravilnosti, kritičnosti mjesta na kojem se nalazi nepravilnost te kritičnosti same komponente, pa i trenutka u kojem bi došli do otkaza, do teških posljedica.

U samom praktičnom dijelu ovog rada je prikazana mogućnost kvantitativne analize penetrantskog sustava uz postojeću kvalitativnu analizu, prednost u kvantitativnoj analizi je u tome što nakon određivanja veličine nepravilnosti iz slikovnog zapisa, dobivamo mogućnost usporedivosti korištenog penetrantskog sustava, i na taj način osiguranje sljedivosti. Kako bi se povećala pouzdanost rezultata bilo bi uputno koristiti bolji fotoaparat od onog korištenog u ovom praktičnom radu, a osim toga bilo bi potrebno i postaviti novu mjerku uz etalon kod koje ne bi dolazilo do velikog zacrnjenja, koje vodi do rezultata koji su upitne pouzdanosti.

## 7. LITERATURA

- [1] Sandra, Jantol, Diplomski rad, Zagreb, 2014
- [2] Liquid penetrant testing  
<https://eis.hu.edu.jo/ACUploads/10526/Liquid%20Penetrant%20Testing.pdf>;  
1.12.2016.
- [3] EN 571-1:1997 Non-destructive testing, Penetrant testing, General principles
- [4] FAA: „Study of the factors affecting the sensitivity of liquid penetrant inspections: review of literature published from 1970 to 1998
- [5] Ispitivanje penetrantima  
[https://www.grad.unizg.hr/\\_download/repository/2a\\_P-NDT-ispitivanje\\_penetrantima\\_%5BRead-Only%5D.pdf](https://www.grad.unizg.hr/_download/repository/2a_P-NDT-ispitivanje_penetrantima_%5BRead-Only%5D.pdf); 22.2.2017.
- [6] Emulsifiers  
<https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/PenetrantTest/PTMaterials/emulsifiers.htm>; 22.2.2017
- [7] EN ISO 3542-3:2013 Non-destructive testing: Penetrant testig - Part 3: Reference test blocks
- [8] Reference block no. 2  
<http://www.helling.de/en/article/?kategorie=Eindringprfung&id=1&selected=163>;  
18.10.2106.
- [9] Imagej download  
<http://imagej.net/Welcome>; 6.2.2017.
- [10] MIL-HDBK-1823A:2009 Nondestructive evaluation system reliability assessment